

一个新型的基于全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪 BOTDR 系统

何玉钧 尹成群 李永倩 杨志

(华北电力大学电子与通信工程系,保定 071003)

摘要 报道了新型的分布式传感测量布里渊光时域反射(BOTDR)系统. 布里渊散射频移和强度均依赖于温度和应变,因此,BOTDR 利用光纤中的自发布里渊散射作为测量信号可以实现分布式温度和应变测量. 在 BOTDR 中,光源采用窄谱半导体激光器,并由声光调制器调制成脉冲光,经掺铒光纤放大器放大后,注入测试光纤以产生自发布里渊散射. 利用双通 Mach-Zehnder 干涉仪分离光纤背向散射中的自发布里渊散射与瑞利散射信号,实现了自发布里渊散射的直接检测. 实验结果表明基于全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪 BOTDR 方案是可行的.

关键词 光时域反射计;布里渊散射;Mach-Zehnder 干涉仪;分布式光纤传感

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A

0 引言

基于光时域反射技术(OTDR)的分布式光纤传感系统具有许多重要的优点,它可以实现沿传感光纤分布的每一点传感量的测量,具有广阔的应用前景. 在 OTDR 中,一脉冲光沿光纤传输,通过测量其背向瑞利散射就可以确定整个光纤上各点的损耗,而光纤中的布里渊散射信号与加在光纤上的温度和应变密切相关,因此,利用自发布里渊散射信号代替瑞利散射作为传感信号,一个布里渊光时域反射(BOTDR)系统就可以实现分布式温度、应变测量. 在研究中, Kurashima T 等人首次利用相干检测技术实现了一个 BOTDR 系统,并获得了较好的实验结果^[1],基于这种技术,日本安藤公司还研制出了基于自发布里渊散射的光纤应变测试仪. 近年来,相对于相干检测技术,提出了一种基于 Mach-Zehnder 干涉仪的直接检测技术. 它利用全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪将自发布里渊散射信号从瑞利散射中分离出来,从而实现自发布里渊散射的直接检测^[2,3].

在前面的工作中^[4],我们讨论了全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪分离自发布里渊散射和瑞利散射的基本原理,并且设计了一个高性能的全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪. 本文报道了一个基于全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的 BOTDR 实验系统,并给出实验测试结果.

1 基本理论

1.1 布里渊散射

在通常情况下,当光波在光纤中传播时,将产生三种主要的光散射,它们分别是瑞利散射、喇曼散射和布里渊散射. 其中自发布里渊散射是光波在光纤中传播时与声波相互作用而产生的一种非线性光散射过程. 由于声波的作用,散射光的频率相对于入射光有一个频移,通常称之为布里渊频移,其大小由下式给出^[5]

$$\nu_B = 2n\nu_s/\lambda_0 \quad (1)$$

式中, ν_B 为布里渊频移, n 为光纤纤芯折射率, ν_s 为声波的速度, λ_0 为入射光在真空中的波长. 对于普通的硅玻璃光纤,当入射光的波长 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ 时,布里渊频移 $\nu_B \approx 11.2 \text{ GHz}$. 由于光纤材料的折射率、光纤中声波的速度均为应变、温度的函数,研究表明,布里渊频移 ν_B 与温度 t 和应变 ε 呈线性关系,并可表示为^[6]

$$\nu_B = \nu_0 + \frac{\partial \nu}{\partial t}t + \frac{\partial \nu}{\partial \varepsilon}\varepsilon \quad (2)$$

式中, ν_0 为温度为 0°C 、应变为 $0 \mu\varepsilon$ 时的布里渊频移. 同时,通过求解布里渊损耗的耦合波动方程还发现布里渊散射的强度与温度和应变之间同样存在线性关系,布里渊散射功率 P_B 与温度 t 和应变 ε 的关系可表示为^[6]

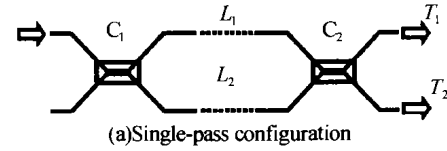
$$P_B = P_0 + \frac{\partial P}{\partial t}t + \frac{\partial P}{\partial \varepsilon}\varepsilon \quad (3)$$

式中, P_0 为温度为 0°C 、应变为 $0 \mu\varepsilon$ 时的布里渊散射功率. 式(2)、(3)表明,通过测量布里渊散射的频移和强度就可以实现沿光纤分布的温度和应变的测量. 同时,式(2)、(3)也构成了基于布里渊散射的分布式光纤传感系统的传感机理.

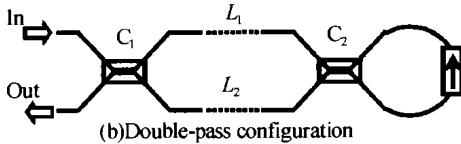
1.2 Mach-Zehnder 干涉仪

一个全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪是由两个 $2 \times$

2 光纤直接耦合器 C_1 、 C_2 和连接它们的光纤臂 L_1 、 L_2 构成的,如图 1(a)所示. 当构成干涉仪的两个耦合器为标准 3 dB 耦合器及干涉仪两臂的光纤为同种光纤时,在干涉仪一个输入端口注入光功率,可以推出干涉仪两输出端的强度传输系数分别为^[4]



(a) Single-pass configuration



(b) Double-pass configuration

图 1 全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪结构

Fig. 1 Structure of all fiber Mach-Zehnder interferometer

$$T_1 = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi\nu n \Delta L}{C} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi\nu}{FSR} \right) \right] \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\nu n \Delta L}{C} \right) \right] = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\nu}{FSR} \right) \right] \quad (5)$$

式中, C 为真空中的光速, ν 为光波的频率, n 为光纤纤芯的折射率, $\Delta L = L_1 - L_2$ 为干涉仪两臂的长度差, FSR 为干涉仪的自由程. 从式(4)、(5)可以看出, 两输出端强度传输系数 T_1 、 T_2 是互补的, 它们均为光波频率的函数.

在光纤的背向散射中, 瑞利散射的频率与入射光频率相同, 因此, 布里渊散射光与瑞利散射光之间的频差为布里渊频移 ν_B . 根据式(4)、(5), 可以得出一个结论: 在 Mach-Zehnder 干涉仪的输入端同时注入布里渊散射和瑞利散射光, 当设置干涉仪的自由程为两倍的布里渊频移时(即 $FSR = 2\nu_B$), 布里渊散射光和瑞利散射光将在干涉仪的两个输出端分别输出. 也就是说, 当 Mach-Zehnder 干涉仪的自由程为 $2\nu_B$ 时, 该干涉仪具有分离光纤背向散射中自发布里渊散射与瑞利散射信号的能力. 其中, 干涉仪的自由程是由干涉仪的臂差决定的, 当自由程为 $2\nu_B$ 时, 其臂差 ΔL 为

$$\Delta L = \frac{C/n}{FSR} = \frac{C/n}{2\nu_B} \quad (6)$$

由于 Mach-Zehnder 干涉仪性能受多种因素的影响, 实际上利用单通 Mach-Zehnder 干涉仪很难实现自发布里渊散射和瑞利散射的理想分离. 为了解决这个问题, 可以利用双通 Mach-Zehnder 干涉仪来实现自发布里渊散射的与瑞利散射的有效分离, 双通 Mach-Zehnder 干涉仪可由一个单通 Mach-Zehnder 干涉仪和一个光隔离器构成, 如图 1(b)所示. 和单通 Mach-Zehnder 干涉仪相比, 双通 Mach-Zehnder 干涉仪对自发布里渊散射信号进行了两次过滤, 对瑞利散射的抑制大大增强.

2 BOTDR 实验系统

BOTDR 实验系统如图 2 所示. 系统采用一个半导体激光器(LD)作为光源, 其输出功率约为 4.15 mW, 中心波长为 1550.99 nm, 谱宽为 1 MHz. LD 输出的连续光功率经过一个声光调制器(AOM)调制成宽度为 600 ns、重复频率为 3.5 kHz 的光脉冲, 然后送入掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大. 由于 EDFA 具有较强的自发辐射(ASE)噪声, 经 EDFA 放大后的光脉冲首先通过一个由环形器和光纤布喇格光栅(FBG)构成的滤波器将大部分 ASE 噪声滤除, 再通过一个 3 dB 耦合器 C 注入被测光纤. 脉冲光在传感光纤中产生的背向散射光同时由耦合器 C 耦合出来并注入 Mach-Zehnder 干涉仪(M-Z). 在实验中, 被测光纤由两段单模色散位移光纤熔接在一起组成, 其中 D_1 的长度为 20 km, D_2 的长度为 2 km. 实验测得该光纤的布里渊频移约为 10.6 GHz.

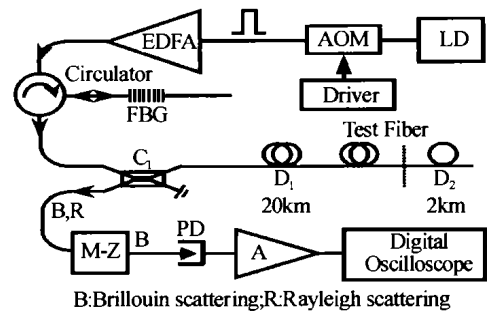


图 2 BOTDR 实验系统

Fig. 2 Experimental schematic diagram of BOTDR

利用两个 3 dB 光纤耦合器和一个光隔离器, 我们制作了一个全光纤双通 Mach-Zehnder 干涉仪, 如图 3 所示. 由于测试光纤的布里渊频移为 10.6 GHz, 因此干涉仪的自由程设置为 21.2 GHz, 对应的臂差 ΔL 约为 9.7 mm. 为了实现干涉仪自由程的调节, 将干涉仪一个臂的光纤密绕在一个圆桶型压电陶瓷(PZT)上, 通过调节加在 PZT 两电极上的直流电压来实现干涉仪自由程的控制, 从而实现自发布里渊散射和瑞利散射的分离. 同时, 将干涉仪置入一个隔热的密闭箱中以防止外界环境温度扰动对干涉仪的影响. 当测试光纤的背向散射光注入输入口 1, 通过调节干涉仪, 瑞利散射信号和布里渊散射信号将分别从输出端口 3 和 4 输出. 由于光隔离器的作用, 从输出端口 3 输出的瑞利散射信号将被隔离不再

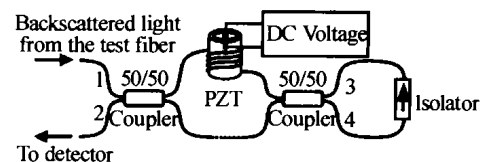


图 3 双通 Mach-Zehnder 干涉仪结构

Fig. 3 Configuration of double-pass Mach-Zehnder interferometer

进入端口 4, 相反地, 从输出端 4 输出的布里渊散射信号将通过隔离器经端口 3 重新进入干涉仪, 在端口 2 输出并由光电检测器(PD)检测. 最后, 检测器的输出信号经一个电放大器(A)放大并由数字存储示波器平均 256 次后存储在示波器中.

3 实验结果

为了检验干涉仪的性能, 我们利用实验制作的全光纤双通 Mach-Zehnder 干涉仪完成了自发布里渊散射信号与瑞利散射信号的分离实验, 测量了从瑞利散射中分离出来的自发布里渊散射信号的频谱, 如图 4 所示. 实验选用了自由程为 10 GHz 的 Fabry-Perot 光谱分析仪作为光谱测试仪. 实验结果表明, 经过 Mach-Zehnder 干涉仪, 被测光纤背向散射中的瑞利散射信号几乎得到完全抑制, 一个较为纯净的自发布里渊散射信号得到了检测.

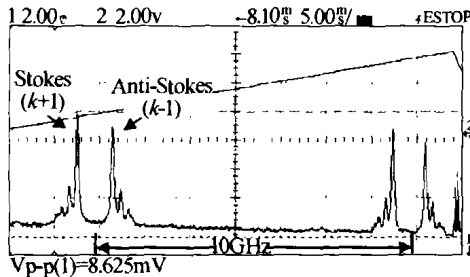


图 4 自发布里渊散射谱

Fig. 4 The spectrum of spontaneous Brillouin scattering

图 5(a)、(b) 为利用图 2 所示的 BOTDR 实验系统所得到的实验结果. 其中图 5(a) 为常温下得到的测试光纤自发布里渊散射时域反射波形, 由于测试光纤是由两段光纤连接组成的, 因此在两段光

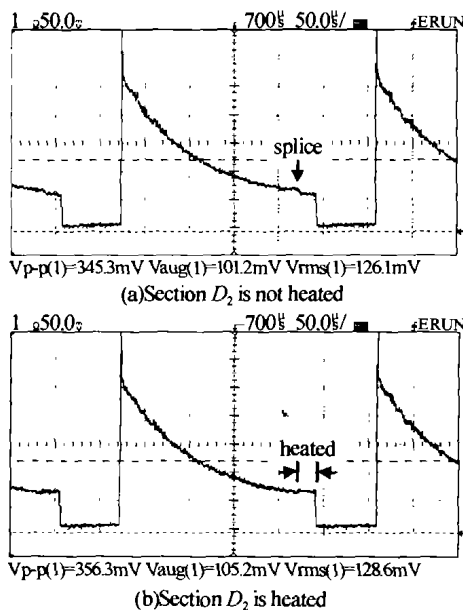


图 5 自发布里渊散射 OTDR 曲线

Fig. 5 Spontaneous Brillouin OTDR traces

纤的熔接处存在明显的衰减. 图 5(b) 为光纤段 D₂ 加热后的自发布里渊散射时域反射波形, 其中加热温度约 60℃, 室温约 20℃. 实验波形表明, 加热段光纤的自发布里渊散射的强度比加热前明显增强了, 这很好地证明了自发布里渊散射强度与温度之间的关系. 实际上, 为了同时研究沿同一光纤分布的温度和应变情况, 必须同时定量测量自发布里渊散射的强度和布里渊散射的频移. 在本文中, 仅仅定性研究了自发布里渊散射强度与温度之间的关系.

4 结论

一个新型的基于干涉仪的检测技术运用到了自发布里渊散射信号的检测中, 实验制作的全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪在实现布里渊散射信号和瑞利散射信号的分离中表现了较好的性能. 由于 Mach-Zehnder 干涉仪具有结构简单, 成本低等优点, 因此大大降低了 BOTDR 信号检测系统的成本, 也为基于自发布里渊散射的分布式光纤传感系统的实用化提供了前景. 初步的实验结果表明, 本文提出的 BOTDR 系统方案是可行的.

参考文献

- 1 Kurashima T, Horiguchi T, Izumita H, et al. Brillouin optical-fiber time domain reflectometry. *IEICE Trans Commun*, 1993, **E76-B**(4): 382 ~ 389
- 2 De Souza K, Lees G P, Wait P C, et al. Diode-pumped landau-placzek based distributed temperature sensor utilizing an all-fibre Mach-Zehnder interferometer. *Electron Lett*, 1996, **32**(23): 2174 ~ 2175
- 3 Kee H H, Lees G P, Newson T P. All-fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing by spontaneous Brillouin scattering. *Optical Lett*, 2000, **25**(10): 695 ~ 697
- 4 何玉钧, 李永情, 杨志, 等. 全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪及其在光纤自发布里渊散射测量中的应用. *光子学报*, 2002, **31**(7): 865 ~ 869
He Y J, Li Y Q, Yang Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7): 865 ~ 869
- 5 Tkach R W, Chraplyvy A R, Derosier R M. Spontaneous Brillouin scattering for single-mode optical-fibre characterisation. *Electron Lett*, 1986, **22**(19): 1011 ~ 1013
- 6 Smith Jeff, Brown Anthony, DeMerchant Michael, et al. Simultaneous distributed strain and temperature measurement. *Applied Optics*, 1999, **38**(25): 5372 ~ 5377

A Novel BOTDR System Based on All Fiber Mach-Zehnder Interferometer

He Yujun, Yin Chengqun, Li Yongqian, Yang Zhi

Department of Electronic & Telecommunication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003

Received date: 2003-05-20

Abstract A Brillouin optical-fiber time domain reflectometry (BOTDR) system for distributed sensing measurement was reported. Both Brillouin frequency shift and intensity depend on the temperature and strain, therefore, using spontaneous Brillouin scattering in optical fiber as the measurement signal, a BOTDR can measure the temperature and strain along the fiber. In BOTDR, a narrow line width LD was used as a light source. The light from LD was modulated into light pulses by an AOM and amplified by an EDFA to generate spontaneous Brillouin OTDR signal. A double-pass Mach-Zehnder interferometer was used to separate the spontaneous Brillouin scattering from Rayleigh scattering, thus a direct optical detection method was applied in the detection of spontaneous Brillouin scattering light. The experimental results showed that the configuration of the BOTDR based on all fiber Mach-Zehnder interferometer was feasible.

Keywords OTDR; Brillouin scattering; Mach-Zehnder interferometer; Distributed optical fiber sensing



He Yujun was born on November 14, 1974. He received M. S. degree from North China Electric Power University (NCEPU) in 2002. During his graduate career, he went to Gunma University in Japan as an exchange student for the research "Distributed Optical Fiber Temperature/Strain Sensor Based on Spontaneous Brillouin Scattering" from July 2000 to July 2001. Now he works as an assistant in NCEPU, and his research interest is optical fiber sensor.